

PCT

WELTORGANISATION FÜR GEISTIGES EIGENTUM  
Internationales Büro



INTERNATIONALE ANMELDUNG VERÖFFENTLICHT NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE  
INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT)

<p>(51) Internationale Patentklassifikation 6 : B64G 1/26, G05D 1/08</p>	<p>A1</p>	<p>(11) Internationale Veröffentlichungsnummer: WO 98/49058 (43) Internationales Veröffentlichungsdatum: 5. November 1998 (05.11.98)</p>
<p>(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP98/01595 (22) Internationales Anmeldedatum: 19. März 1998 (19.03.98) (30) Prioritätsdaten: 197 18 922.9 25. April 1997 (25.04.97) DE (71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten ausser US): DAIM- LER-BENZ AKTIENGESELLSCHAFT [DE/DE]; D-70546 Stuttgart (DE). (72) Erfinder; und (75) Erfinder/Anmelder (nur für US): SCHÜTTE, Andreas [DE/DE]; Colbestrasse 32, D-10247 Berlin (DE). AUF DER HEIDE, Kolja [DE/DE]; Elberfelder Strasse 9, D-10555 Berlin (DE). (74) Anwalt: LINDNER-VOGT, Karin; Daimler-Benz Aktienge- sellschaft, Intellectual Property Management, Gebäude 17, Sedanstrasse 10, D-89077 Ulm (DE).</p>		<p>(81) Bestimmungsstaaten: JP, US, europäisches Patent (DE, FR, GB).  Veröffentlicht Mit internationalem Recherchenbericht.</p>
<p>(54) Title: METHOD FOR LOW-FUEL, COMPUTER-ASSISTED CONTROL OF ANY NUMBER OF THRUSTERS ARRANGED ON A SPACECRAFT (54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUR TREIBSTOFFMINIMALEN, RECHNERGESTÜTZTEN ANSTEUERUNG FÜR BELIEBIG AN EINEM RAUMFAHRZEUG ANGEORDNETE DÜSEN (57) Abstract <p>The invention relates to a method for low-fuel, computer-assisted control of any number of thrusts mounted in any given arrangement on a spacecraft, which solves the problem of linear optimization by reducing computational effort in a very short time. The method is based on the dual simplex algorithm and suitable provision of a dual admission start table. The dual admission start table is set up on the basis of a previously calculated optimum table and a transformation of the actual force/power vector pertaining to the chosen optimum table. Given processing steps of the dual simplex algorithm are skipped totally or are substituted by processing steps which require substantially less computational effort. Finally, a reduced table as opposed to the simplex table is used. Said reduced table consists solely of an identification number for selecting a thruster from the entire number of thrusters and the vector of the control values of the thrusters which are contained in said selection. Reduction in computational effort is achieved by carrying out given processing steps in advance and by providing the corresponding results in the form of data fields and index or identification number matrixes in the working memory of the computer. Said results from the initialization phase of the method need only to be addressed and retrieved in order to calculate thruster control.</p><p>(57) Zusammenfassung <p>Es soll ein Verfahren zur insgesamt treibstoffminimalen, rechnergestützten Ansteuerung einer beliebig festgelegten Anzahl und beliebig festgelegten Anordnung von Düsen an einem Raumfahrzeug angegeben werden, das dieses lineare Optimierungsproblem durch Reduzierung des Rechenaufwands in möglichst kurzer Zeit löst. Das Verfahren basiert auf dem dualen Simplexalgorithmus und der geeigneten Bereitstellung eines dual zulässigen Starttableaus. Das dual zulässige Starttableau wird aus einem vorab berechneten Optimaltableau und der zu diesem gewählten Starttableau dazugehörigen Transformation des aktuellen Kräfte-Momenten-Vektors aufgebaut. Bestimmte Verarbeitungsschritte des dualen Simplexalgorithmus entfallen vollständig bzw. werden durch Verarbeitungsschritte substituiert, die wesentlich weniger Rechenaufwand benötigen. Schließlich wird nicht mit dem Simplextableau, sondern mit einem reduzierten Tableau gearbeitet. Dieses reduzierte Tableau besteht lediglich aus einer Identifikationsnummer für eine Düsenauswahl aus der Gesamtzahl der Düsen und dem Vektor der Ansteuerwerte für diejenigen Düsen, die in dieser Düsenauswahl enthalten sind. Die Reduzierung des Rechenaufwands wird dadurch erreicht, daß bestimmte Verarbeitungsschritte vorab durchgeführt werden und die entsprechenden Ergebnisse dann in Form von Datenfeldern und Indizes- bzw. Identifikationsnummernmatrixen im Arbeitsspeicher des Rechners bereitliegen. Diese Ergebnisse des Initialisierungsteils des Verfahrens brauchen dann zur Berechnung der Düsenansteuerung nur noch adressiert und abgerufen zu werden.</p></p></p>		

# **LEDIGLICH ZUR INFORMATION**

Codes zur Identifizierung von PCT-Vertragsstaaten auf den Kopfbögen der Schriften, die internationale Anmeldungen gemäss dem PCT veröffentlichen.

AL	Albanien	ES	Spanien	LS	Lesotho	SI	Slowenien
AM	Armenien	FI	Finnland	LT	Litauen	SK	Slowakei
AT	Österreich	FR	Frankreich	LU	Luxemburg	SN	Senegal
AU	Australien	GA	Gabun	LV	Lettland	SZ	Swasiland
AZ	Aserbaidshon	GB	Vereinigtes Königreich	MC	Monaco	TD	Tschad
BA	Bosnien-Herzegowina	GE	Georgien	MD	Republik Moldau	TG	Togo
BB	Barbados	GH	Ghana	MG	Madagaskar	TJ	Tadschikistan
BE	Belgien	GN	Guinea	MK	Die ehemalige jugoslawische Republik Mazedonien	TM	Turkmenistan
BF	Burkina Faso	GR	Griechenland	ML	Mali	TR	Türkei
BG	Bulgarien	HU	Ungarn	MN	Mongolei	TT	Trinidad und Tobago
BJ	Benin	IE	Irland	MR	Mauretanien	UA	Ukraine
BR	Brasilien	IL	Israel	MW	Malawi	UG	Uganda
BY	Belarus	IS	Island	MX	Mexiko	US	Vereinigte Staaten von Amerika
CA	Kanada	IT	Italien	NE	Niger	UZ	Usbekistan
CF	Zentralafrikanische Republik	JP	Japan	NL	Niederlande	VN	Vietnam
CG	Kongo	KE	Kenia	NO	Norwegen	YU	Jugoslawien
CH	Schweiz	KG	Kirgisistan	NZ	Neuseeland	ZW	Zimbabwe
CI	Côte d'Ivoire	KP	Demokratische Volksrepublik Korea	PL	Polen		
CM	Kamerun	KR	Republik Korea	PT	Portugal		
CN	China	KZ	Kasachstan	RO	Rumänien		
CU	Kuba	LC	St. Lucia	RU	Russische Föderation		
CZ	Tschechische Republik	LI	Liechtenstein	SD	Sudan		
DE	Deutschland	LK	Sri Lanka	SE	Schweden		
DK	Dänemark	LR	Liberia	SG	Singapur		
EE	Estland						

5

10     Verfahren zur treibstoffminimalen, rechnergestützten Ansteuerung für beliebig an einem Raumfahrzeug angeordnete Düsen

15     Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur insgesamt treibstoffminimalen, rechnergestützten Ansteuerung einer beliebig festgelegten Anzahl und beliebig festgelegten Anordnung von Düsen an einem Raumfahrzeug. Die Düsen können dabei diskret oder auch kontinuierlich ansteuerbar sein.

20     Für die Ausübung von äußeren Kräften und Momenten an einem Raumfahrzeug ist der Einsatz von Düsen in vielen Situationen notwendig. Da der Einsatz der Düsen Treibstoff verbraucht und dieser unmittelbar Einfluß auf das Startgewicht und die  
25     Lebensdauer von Raumfahrzeugen und insbesondere von Satelliten hat, kommt der Düsenansteuerung mit in der Summe minimalem Treibstoffverbrauch eine wichtige Bedeutung zu. Düsenanordnungen, die prinzipiell einen niedrigen Treibstoffverbrauch ermöglichen, eine höhere oder gleiche Redundanz bei kleinerer  
30     Düsenanzahl aufweisen und/oder durch die Nutzlast am Raumfahrzeug beeinflußt sind, sind oft unregelmäßige und schiefwinklige Düsenanordnungen. Aus diesen Gründen ist die Forderung nach der treibstoffminimalen Düsenansteuerung, insbesondere auch für beliebige (schiefwinklige) feste Düsenanordnungen an Raumfahr-  
35     zeugen von besonderer Relevanz.

Es ist bekannt, daß sich das Problem der treibstoffminimalen Düsenansteuerung auf ein lineares Optimierungsproblem zurück-

führen läßt, für das der Simplexalgorithmus ein geeignetes und effizientes Lösungsverfahren darstellt (siehe zum Beispiel P.J. Wiktor "Minimum Control Authority Plot: A Tool for Designing Thruster Systems" In: Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 17, No. 5, Sept.-Oct. 1994, pp. 4-5). Der Einsatz des Simplexalgorithmus scheitert jedoch häufig an der benötigten Rechenzeit. So können oft die Echtzeitanforderungen zum Beispiel für den Einsatz des Simplexalgorithmus innerhalb des Regeltaktes des Lage- und Positionsregelkreises eines Raumfahrzeuges nicht erfüllt werden, weil die besonders in hohen Orbits einsetzbaren Rechner den Simplexalgorithmus nicht ausreichend schnell abarbeiten können.

Eine Vielzahl der sich heute im Einsatz befindenden Raumfahrzeuge (Satelliten) besitzen eine Düsenanordnung, bei der jede Düse zum körperfesten Koordinatensystem des Raumfahrzeugs zu einer Achse parallel und damit zu den zwei anderen Achsen orthogonal angeordnet ist. Diese orthogonale und achsenparallele Anordnung hat zur Folge, daß jede Düse nur Kräfte in einem Richtungssinn einer Achsenrichtung und Momente nur in einem Drehsinn um die beiden anderen Achsen erzeugen kann. Der Vorteil dieser Anordnung ist, daß die Steuerung eines jeden Freiheitsgrades des Raumfahrzeuges als starrem Körper durch den Einsatz von jeweils nur zwei Düsen möglich ist, ohne andere Freiheitsgrade zu beeinflussen. Die Ansteuerung der Düsen ist für diese Düsenanordnung sehr einfach. Der Nachteil dieser Düsenanordnung besteht darin, daß mindestens zwölf Düsen notwendig sind, um alle Freiheitsgrade gleichzeitig und beliebig steuern zu können. Muß der Ausfall von zwei beliebigen Düsen tolerierbar sein, sind 36 Düsen erforderlich.

Demgegenüber liegt der Vorteil einer geeigneten schiefwinkligen, also nicht orthogonalen und achsenparallelen Düsenanordnung im wesentlichen in folgenden drei Punkten:

1. Bei frei wählbarer fester Düsenanordnung sind weniger als 12 Düsen erforderlich.
2. Für die Tolerierung des Ausfalls von zwei beliebigen Düsen

sind erheblich weniger als 36 Düsen erforderlich.

3. Bei treibstoffminimaler Ansteuerung der Düsen ist ein geringerer Treibstoffverbrauch möglich.

5 Der Nachteil dieser Düsenanordnung besteht darin, daß die treibstoffminimale Düsenansteuerung die Lösung eines linearen Optimierungsproblems erfordert und der Rechenaufwand für die Lösung dieses Problems mit dem Simplexalgorithmus oft zu hoch ist. Aus diesem Grunde sind andere Verfahren entwickelt worden,  
10 die weniger Rechenzeit benötigen und durch die eine mehr oder weniger treibstoffminimierte, aber keine insgesamt treibstoffminimale Düsenansteuerung erreicht werden kann.

15 Beim sogenannten "Linear Programming" wird das Düsenansteuerungsproblem als lineares Optimierungsproblem aufgefaßt und mit einschlägigen Verfahren der linearen Optimierung, wie zum Beispiel den Simplexalgorithmus, gelöst. Der schon erwähnte Nachteil, der den Einsatz dieses Verfahrens in vielen Fällen unmöglich macht, ist der zu hohe Rechenaufwand.

20 Beim "Table Look-up"-Verfahren werden alle treibstoffminimalen Düsenanordnungen für Einheitskräfte und -momente bezüglich einer Achse des körperfesten Koordinatensystems des Raumfahrzeugs berechnet (Lösen des linearen Optimierungsproblems) und  
25 in einer Tabelle abgelegt. Sind im Einsatz Kräfte und Momente bezüglich mehrerer Achsen gleichzeitig auszuüben, werden die entsprechenden Düsenansteuerungen bezüglich Kraft oder Moment und für jede geforderte Achse und dem geforderten Richtungs- oder Drehsinn aus der Tabelle ausgelesen und mit dem entsprechenden Betragswert der Kraft- bzw. Momentenkomponente in  
30 dieser Richtung multipliziert. Den Ansteuerwert für jede Düse erhält man durch die Addition der einzelnen Werte für die jeweilige Düse. Dieses Verfahren ist sehr einfach und sehr schnell, führt im allgemeinen aber zu nicht treibstoffminimalen  
35 Düsenansteuerungen.

Bei verfeinerten und erweiterten "Table Look-up"-Verfahren handelt es sich um Verfahren, die eine Look-up-Tabelle anlegen,

die Einträge für zusätzlich eingeführte Achsen enthalten. Durch diese Verfahren können treibstoffsparende Düsenansteuerungen ermittelt werden. Zugleich nimmt aber die Übersichtlichkeit des Verfahrens ab und wegen der zunehmenden Größe der Tabellen der Rechenaufwand erheblich zu.

Andere Verfahren beruhen auf der Auswertung und Verbesserung des Ergebnisses, das mit dem "Table Look-up"-Verfahren ermittelt wird. Das Ziel dieser Auswertung besteht darin, besonders treibstoffverschwendende Düsenansteuerungen zu verhindern bzw. geeignet zu korrigieren. Hier soll exemplarisch ein Verfahren, das auf einem Fuzzy-Ansatz beruht, genannt werden (vgl. T.Suzuki, K.Yasuda, S.Yoshikawa, K.Yamada, N.Yoshida "An Application of Fuzzy Algorithm to Thruster Control Systems of Spacecraft" In: ISTS 94-c-16, 19th International Symposium on Space Technology and Science, Yokohama, Japan, May 15-24, 1994, pp. 1 - 8).

Eine Treibstoffminimierung der Düsenansteuerung insgesamt hat zum Ziel eine solche Ansteuerung der Düsen zu ermitteln, die

1. die geforderten Kräfte und Momente am Raumfahrzeug ausübt,
2. für jede Düse einen nichtnegativen Ansteuerwert liefert, und
3. die Summe aller Ansteuerwerte der Düsen minimiert.

Dies stellt - wie erwähnt - ein lineares Optimierungsproblem dar. Da das Lösen des Problems in der Regel zu zeitaufwendig ist, kann die Lösung des quadratischen Optimierungsproblems als Ersatzproblem durchgeführt werden.

Die Lösung des Ersatzproblems führt zur Ermittlung derjenigen Düsenansteuerung, die

1. die geforderten Kräfte und Momente am Raumfahrzeug ausübt,
2. für jede Düse einen nichtnegativen Ansteuerwert liefert, und

3. die Summe aller quadratischen Ansteuerwerte der Düsen minimiert.

5 Dieses quadratische Optimierungsproblem kann über die Bereitstellung der Moore-Penrose-invertierten Systemmatrix der Düsenanordnung am Raumfahrzeug und eines Offsetvektors, der mit Hilfe der singulären Wertzerlegung berechnet wird (vgl. z.B. B.Noble, I.W.Daniel "Applied linear algebra" Prentice-Hall International, INC. (1988), pp. 338 - 350), gelöst werden. Die Lösung des quadratischen Optimierungsproblems kommt dann als Produkt der Moor-Penrose-invertierten Systemmatrix mit dem kommandierten Kräfte-Momenten-Vektor und der Addition des Offsetvektors zustande. Die Addition des Offsetvektors bewirkt, daß im Lösungsvektor nur nicht negative Ansteuerwerte  
15 auftreten. Die Berechnung des Offsetvektors wird jedoch dann numerisch immer aufwendiger, wenn die Zahl der anzusteuernenden Düsen um zwei oder mehr über der Dimension des kommandierten Kräfte-Momenten-Vektors liegt. Im allgemeinen ist die Lösung nicht treibstoff-minimal, fällt aber mit der Lösung des  
20 linearen Optimierungs-problems zusammen, wenn die Zahl der anzusteuernenden Düsen nur um eins größer ist als die Dimension des kommandierten Kräfte-Momenten-Vektors (vergleiche. z.B. DE 195 19 732 A1) . Weiterhin ist nachteilig, daß längere Einschaltzeiten überproportional "bestraft" werden und daher  
25 seltener in den Ansteuerungen vorkommen. Für den Betrieb der Düsen und ihrem Wirkungsgrad ist es jedoch günstiger, sie mit längeren Einschaltzeiten zu betreiben.

30 Der Nachteil bestehender Verfahren besteht mithin darin, daß sie entweder nicht das lineare Optimierungsproblem lösen und damit im allgemeinen nicht die treibstoffminimale Ansteuerung der Düsen bereitstellen oder aber, wenn bei den Ansteuerverfahren das lineare Optimierungsproblem gelöst wird und der Simplexalgorithmus ausgeführt wird, dieses üblicherweise zu  
35 rechenaufwendig ist.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren der

eingangs angegebenen Art bereitzustellen, mit dem das lineare Optimierungsproblem für die treibstoffminimale Ansteuerung beliebig fester Düsenanordnungen zur gleichzeitigen Realisierung von Kräften und Momenten an einem Raumfahrzeug in  
5 signifikant kürzerer Zeit gelöst werden kann, als es bisher möglich ist.

Diese Aufgabe wird gemäß der Erfindung durch die im Anspruch 1 gekennzeichneten Merkmale gelöst.

Das Verfahren nach der Erfindung basiert also vorteilhaft auf einem, dem Simplexalgorithmus angelehnten Verfahren, das jedoch aufgrund der konsequenten Ausnutzung der Besonderheiten bei der Düsenansteuerung bei Raumfahrzeugen und der Aufgabe der Verwen-  
15 dung des üblichen Simplextableaus zu einer Rechenzeitverkürzung von ca. einer Größenordnung führt.

Vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterführungen des Verfahrens nach der Erfindung sind in den dem Anspruch 1 nachfolgenden Patentansprüchen gekennzeichnet.

Das Verfahren nach der Erfindung basiert auf folgenden Grundlagen:

a) Das bei der Düsenansteuerung zu lösende lineare Optimierungsproblem kann wie folgt aufgeschrieben werden:

Gesucht ist der Ansteuervektor  $\underline{k}_{opt}$ , der die Ansteuerwerte für alle Düsen enthält und folgende Bedingungen erfüllen muß:

1. Durch  $\underline{k}_{opt}$  müssen die geforderten Kräfte und Momente  $\underline{b}_{kom}$  am Raumfahrzeug ausgeübt werden. Das heißt, die Gleichung  $\underline{A}_{sys} \cdot \underline{k}_{opt} = \underline{b}_{kom}$  muß erfüllt werden, wobei  $\underline{A}_{sys}$  die Systemmatrix ist, in der die drei Kraft- und die drei Momentenkomponenten für jede einzelne Düse in einer Spalte dieser Matrix eingetragen sind. Die Systemmatrix hat 6 Zeilen wegen der 6 möglichen Freiheitsgrade in der Bewegung des  
30 Raumfahrzeugs, nämlich 3 Kräfte in drei zueinander orthogonalen Achsen und entsprechend 3 Momente um diese Achsen und bei  
35 D Düsen D Spalten.



2.  $k_{\text{opt}} = [k_{\text{opt } 1} \dots k_{\text{opt } j} \dots k_{\text{opt } D}]^T$  darf nur nichtnegative Werte enthalten,

d.h.:  $k_{\text{opt } j} \geq 0, j = 1(1)D.$

3. die Summe aller Ansteuerwerte muß minimal sein (Zielfunktion),

d.h.:  $\sum_{j=1}^D k_{\text{opt } j} = \text{Min} !$

b) Ein Simplextableau besteht aus einem Spaltenvektor der Basisvariablenindizes  $\lambda_b$ , einem Zeilenvektor der Nichtbasisvariablenindizes  $\lambda_{nb}$ , der Koeffizientenmatrix  $A_{\text{tab}}$ , dem Zeilenvektor der auf die Nichtbasisvariablen umgerechneten Zielfunktionskoeffizienten  $p_{\text{tab}}$  und dem Spaltenvektor der Basisvariablenwerte  $b_{\text{tab}}$ :

	$\lambda_{nb,n+1}$	$\dots$	$\lambda_{nb,n+j}$	$\dots$	$\lambda_{nb,n+m}$	
$\lambda_{b,1}$	$a_{11}$	$\dots$	$a_{1j}$	$\dots$	$a_{1m}$	$b_{\lambda_{b,1}}$
$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$
$\lambda_{b,k}$	$a_{k1}$	$\dots$	$a_{kj}$	$\dots$	$a_{km}$	$b_{\lambda_{b,k}}$
$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$
$\lambda_{b,n}$	$a_{n1}$	$\dots$	$a_{nj}$	$\dots$	$a_{nm}$	$b_{\lambda_{b,n}}$
	$p_{\lambda_{nb,n+1}}$	$\dots$	$p_{\lambda_{nb,n+j}}$	$\dots$	$p_{\lambda_{nb,n+m}}$	$-Q_0$

Im Verfahren nach der Erfindung kommt das Simplextableau nicht in dieser vollen Form zum Einsatz.

c) Für die Umsetzung eines beliebigen 6-dimensionalen Kräfte-Momenten-Vektors sind maximal 6 Düsen einer vorhandenen festen Düsenanordnung erforderlich oder der kommandierte Kräfte-Momenten-Vektor ist mit der vorhandenen Düsenanordnung nicht realisierbar.

d) Für jede Düsenauswahl I von 6 aus D Düsen existiert ein Basisvariablenindizesvektor  $\lambda_b(I)$ . Die Nummern oder Indizes (1,2,...,D) der in der Auswahl I enthaltenen Düsen werden im

Basisvariablenindizesvektor  $\underline{\lambda}_b(I)$  zusammengefaßt und die  
 Ansteuerwerte dieser Düsen sind die Werte der Basisvariablen  
 des Simplextableaus. Die Werte der Basisvariablen sind  
 5 entsprechend der Reihenfolge der Düsenindizes in  $\underline{\lambda}_b(I)$  im  
 Basisvariablenwertevektor  $\underline{b}_{\text{tab}}(\underline{\lambda}_b, \underline{b}_{\text{com}})$  abgelegt. Zu jedem  
 Basisvariablenindizesvektor  $\underline{\lambda}_b(I)$  gehört eine Basis-  
 matrix  $\underline{B}_b(I)$ . Die Basismatrix wird gebildet, indem man  
 diejenigen Spalten der Systemmatrix  $\underline{A}_{\text{sys}}$ , die zu den  
 10 ausgewählten Düsen gehören, zu einer neuen Matrix spaltenweise  
 zusammenstellt. Die Reihenfolge der Spalten in der Basismatrix  
 entspricht der Reihenfolge der Indizes der Düsen im  
 dazugehörigen Basisvariablenindizesvektor  $\underline{\lambda}_b(I)$ . Die  
 Nichtbasismatrix  $\underline{B}_{\text{nb}}(I)$  wird aus denjenigen Spalten der  
 15 Systemmatrix zusammengestellt, die zu den nicht in der Auswahl  
 I enthaltenen Düsen gehören. Ihre Indizes sind im Nichtbasis-  
 variablenindizesvektor  $\underline{\lambda}_{\text{nb}}(I)$  zusammengefaßt. Die Reihenfolge  
 der Spalten in der Nichtbasismatrix entspricht der Reihenfolge  
 der Indizes der Düsen im dazugehörigen Nichtbasisvariablen-  
 20 indizesvektor. Die Ansteuerwerte dieser Düsen sind Null.  
 e) Ist für einen kommandierten Kräfte-Momenten-Vektor  $\underline{b}_{\text{kom}}$   
 das Optimaltableau  $\underline{\lambda}_{b.\text{opt}}$ ,  $\underline{\lambda}_{\text{nb.opt}}$ ,  $\underline{A}_{\text{tab.opt}}$ ,  $\underline{p}_{\text{tab.opt}}$  und  
 $\underline{b}_{\text{tab.opt}}$  gefunden, dann sind die Ansteuerwerte der Düsen, die  
 durch die Indizes in  $\underline{\lambda}_{\text{nb.opt}}$  adressiert werden, gleich Null und  
 25 diejenigen Düsen, die den Basisvariablen entsprechen, also  
 durch die Indizes in  $\underline{\lambda}_{b.\text{opt}}$  adressiert werden, enthalten als  
 Ansteuerwert den Wert aus der entsprechenden Zeile des opti-  
 malen Basisvariablenwertevektors  $\underline{b}_{\text{tab.opt}}$ . Der Basisvariablen-  
 indizesvektor  $\underline{\lambda}_{b.\text{opt}}$  gibt die optimale Düsenauswahl an.  
 30 f) Für den Fall der gleichzeitigen Ausübung von allen drei  
 Kraftkomponenten und allen drei Momentenkomponenten ist der  
 Einsatz von maximal 6 der vorhandenen Düsen erforderlich. Es  
 gibt genau

$$A(C_6) = \frac{D \cdot D!}{6! \cdot (D-6)!}$$

35 Möglichkeiten (Kombinationen ohne Wiederholung), 6 aus D Düsen  
 auszuwählen. Werden die Indizes in den beiden Vektoren der  
 Basisvariablenindizes und Nichtbasisvariablenindizes,  $\underline{\lambda}_b$  und

$\lambda_{nb}$ , stets aufsteigend sortiert, so gibt es jeweils genau  $A(C_6^D)$  dieser Vektoren. Für eine feste Düsenanordnung gibt es (nur) eine bestimmte Anzahl von Kombinationen von Düsen, die die Düsenauswahl für eine Lösung des linearen Optimierungsproblems sein können. Diese Anzahl ist im allgemeinen deutlich kleiner als die Anzahl  $A(C_6^D)$ .

Eine wesentliche Grundlage des Verfahrens besteht darin, daß stets mit sortierten Basis- und Nichtbasisvariablenindizesvektoren gearbeitet wird. Im weiteren sind die Indizes oder Nummern der Düsen in den Basis- und Nichtbasisvariablenindizesvektoren z.B. stets der Größe nach sortiert. Auf diese Weise wird es möglich, daß einer Düsenauswahl genau ein Indizesvektor, genau eine Koeffizientenmatrix  $A_{tab} = [a_{tab \ kj}]$ , genau ein Koeffizientenvektor der auf die Nichtbasisvariablen umgerechneten Zielfunktion  $p_{tab}$  und genau eine Basismatrix  $B_b$  und Nichtbasismatrix  $B_{nb}$  zugeordnet werden.

Eine weitere wesentliche Grundlage des Verfahrens besteht darin, daß mit einem reduzierten Tableau gearbeitet wird. Das reduzierte Tableau besteht lediglich aus der Düsenauswahlidentifikationsnummer  $I$  und dem Basisvariablenwertvektor  $b_{tab}$ . Für das Verfahren und die Arbeit mit dem reduzierten Tableau ist neben der Bereitstellung des Feldes der Koeffizientenmatrix aller Optimaltableaus und der Pivotspaltenindizesmatrix auch die Bereitstellung der Düsenauswahlidentifikationsnummernmatrix, der Zeilenaustauschindizesmatrix und der Basisindizesmatrix erforderlich.

Das Verfahren besteht aus zwei Bestandteilen. Der erste, der Initialisierungsteil, dient zum einen der Bereitstellung des Feldes der Koeffizientenmatrix aller Optimaltableaus

$$\underline{F} = \left[ \begin{bmatrix} a_{tab \ kj} \end{bmatrix}_I \right] = \left[ \begin{bmatrix} f_{kjI} \end{bmatrix} \right], \text{ wobei } \left[ \begin{bmatrix} a_{tab \ kj} \end{bmatrix}_I = A_{tab}(I) = B_b^{-1}(I) \cdot B_{nb}(I) \text{ ist.}$$

Die Düsenauswahlidentifikationsnummer läuft von 1 bis  $M$  ( $I = 1(1)M$ ), wobei  $M$  die Anzahl aller Düsenauswahlmöglichkeiten ist, die für einen beliebigen Kräfte-Momenten-Vektor

$\underline{b}_{\text{kom}}$  und die vorliegende beliebige und unveränderliche Düsenanordnung optimal sind. Eine Koeffizientenmatrix eines Optimaltableaus liegt im Sinne dieses Verfahrens dann vor, wenn alle Elemente im zur Koeffizientenmatrix gehörenden Vektor der

Zielfunktionskoeffizienten

$\underline{p}_{\text{tab}} = \underline{p}_{\text{tab}}(\underline{A}_{\text{tab}})$  nicht negativ sind. Für die Elemente der Koeffizientenmatrix muß daher gelten:

$$1 - \sum_{k=1}^6 a_{\text{tab } k j} = p_{\text{tab } j} \geq 0 \text{ für } j = 1(1)6.$$

Zum anderen werden im Initialisierungsteil des Verfahrens folgende Adreßmatrizen: die Pivotspaltenindizesmatrix

$\underline{P} = [p_{Ik}]$ , die Düsenauswahlidentifikationsnummernmatrix  $\underline{U} = [u_{Ik}]$ , die Zeilenaustauschindizesmatrix  $\underline{T} = [t_{Ik}]$  und die Basisindizesmatrix  $\underline{L} = [l_{Ik}]$  bereitgestellt, damit auf die im zweiten Teil des Verfahrens benötigten Daten besonders schnell zugegriffen werden kann und bei der Durchführung der Basisaustauschschritte die Arbeit mit dem reduzierten Tableau möglich wird. Durch die Düsenauswahlidentifikationsnummer  $I = 1, 2, \dots, M$  wird jeder Düsenauswahl, die optimal sein kann, und damit auch jeder Koeffizientenmatrix eines Optimaltableaus eine Identifikationsnummer zugewiesen.

In der Pivotspaltenindizesmatrix  $\underline{P} = [p_{Ik}]$  wird für jede Zeile von jeder in  $\underline{E}$  abgelegten Koeffizientenmatrix der Index der dazugehörigen Pivotspalte  $s \in \{0, 1, 2, 3, \dots, (D - 6)\}$  abgelegt. Für eine Koeffizientenmatrix  $\underline{A}_{\text{tab}}$  und eine gewählte Pivotzeile  $z$  ist die Pivotspalte  $s$  diejenige, für die gilt:

$$\text{Minimum}_{a_{zj} < 0} \frac{p_j}{|a_{zj}|} = \frac{p_s}{|a_{zs}|}, \text{ mit } j = 1(1)(D - 6).$$

D.h. die zu einer Zeile einer Koeffizientenmatrix gehörige Pivotspalte ist diejenige Spalte, in der das Matricelement der Koeffizientenmatrix in dieser Zeile negativ ist und der Quotient aus dem Element des Vektors der auf die Nichtbasisvariablen umgerechneten Zielfunktionskoeffizienten in der Spalte und dem Betrag des entsprechenden Matricelements aus

der Koeffizientenmatrix am kleinsten ist.

Mit Hilfe der Pivotspaltenindizesmatrix ist für eine Düsen-  
auswahl  $I$ , für die in  $F$  eindeutig die dazugehörige  
5 Koeffizientenmatrix  $A_{\text{tab}}(I)$  abgelegt ist, und gewählter  
Pivotzeile  $z$  die Angabe der entsprechenden Pivotspalte mit  
 $s(A_{\text{tab}}(I), z) = p_{Iz}$  aus der Pivotspaltenindizesmatrix möglich,  
ohne daß dazu die Koeffizientenmatrix  $A_{\text{tab}}(I)$  oder der Vektor  
der auf die Nichtbasisvariablen umgerechneten Zielfunktions-  
10 koeffizienten  $p_{\text{tab}}(I)$  benötigt wird.

Existiert zu einer bestimmten Zeile keine Pivotspalte, so ist  
das in der Pivotspaltenindizesmatrix durch eine Null ( $p_{Iz} = 0$ )  
angegeben.

15 In der Düsenauswahlidentifikationsnummernmatrix  $U = [u_{Ik}]$  ist  
für jede Düsenauswahlidentifikationsnummer  $I = 1, 2, \dots, M$  und  
jede Zeile  $z = 1, 2, \dots, 6$  jeder, in  $F$  abgelegten Koeffizienten-  
matrix die Düsenauswahlidentifikationsnummer derjenigen Düsen-  
20 auswahl angegeben, die nach dem Basisaustauschschritt vor-  
liegt, wenn vor dem Basisaustauschschritt die Düsenauswahl  $I$   
vorlag und die Zeile  $z$  als Pivotzeile für den Basisaustausch-  
schritt gewählt wurde. D.h., wenn zum Zeitpunkt  $n$  die Düsen-  
auswahl  $I[n]$  vorliegt und ein Basisaustauschschritt mit der  
25 Pivotzeile  $z[n]$  durchgeführt wird, kann die Identifikations-  
nummer der neu entstehenden Düsenauswahl ohne Verwendung von  
 $A_{\text{tab}}(I)$  mit  $I[n+1] = u_{I[n] z[n]}$  direkt aus der Düsenauswahl-  
identifikationsnummernmatrix ausgelesen werden. Dies wird  
dadurch möglich, daß durch die Kenntnis des aktuellen Tableaus  
30 (bzw. seiner Identifikationsnummer  $I$ ) und der Wahl der  
Pivotzeile die Pivotspalte implizit festgelegt ist. Zur  
Ermittlung des Folgetableaus ist also die explizite Kenntnis  
der Pivotspalte  $s[n]$  unnötig.

35 In der Zeilenaustauschindizesmatrix  $T = [t_{Ik}]$  ist für jede  
Zeile  $z = 1, 2, \dots, 6$  von jeder der in  $F$  abgelegten Koeffizien-  
tenmatrizen der Zeilenindex des Pivotelements im (sortierten)  
reduzierten Tableau angegeben, das nach dem Basisaustausch-

schritt vorliegt, wenn vor dem Basisaustauschschritt die Düsenauswahl I vorlag und die Zeile z als Pivotzeile gewählt wurde.

5 In der Basisindizesmatrix  $\underline{L} = [\underline{l}_I]$  ist für jede Düsenauswahl-identifikationsnummer der Vektor der Indizes der in der Düsenauswahl I enthaltenen Düsen, also der zu I gehörige Basisvariablenindizesvektor  $\underline{\lambda}_b(I) = \underline{l}_I$  angegeben. Die Düsenindizes in den Vektoren  $\underline{l}_I$  sind der Größe nach sortiert.

10 Durch den Initialisierungsteil des Verfahrens wird weiterhin eine Start-Düsenauswahlidentifikationsnummer  $I[0] = I_{\text{start}}$  und die dazugehörige invertierte Basismatrix

15  $\underline{B}_{b.\text{start}}^{-1} = (\underline{B}_b(I_{\text{start}}))^{-1}$  bereitgestellt. Aus numerischen Gründen

werden alle Werte in  $\underline{F}$  und  $\underline{B}_{b.\text{start}}^{-1}$ , die einen sehr kleinen Betrag  $\epsilon$ , (z.B.:  $\epsilon \approx 10^{-6}$ ) haben, zu Null gesetzt.

20 Im zweiten Teil des Verfahrens wird zur Realisierung der im Kräfte-Momentenvektor kommandierten Kräfte und Momente die optimale Düsenansteuerung, d.h. die Ansteuerwerte der einzuschaltenden Düsen ermittelt. Nur dieser Teil des  
25 Verfahrens muß den gestellten Echtzeitanforderungen genügen. Dieser zweite Teil besteht wiederum aus zwei nacheinander auszuführenden Teilen. Zuerst wird ein dual zulässiges reduziertes Tableau als Starttableau ermittelt. Im zweiten Teil wird die erforderliche Anzahl von Basisaustauschschritten  
30 durchgeführt.

Ein dual zulässiges reduziertes Starttableau wird wie folgt ermittelt: Für die Bereitstellung eines dual zulässigen reduzierten Tableaus ist lediglich die Transformation des  
35 aktuellen Kräfte-Momente-Vektors  $\underline{b}_{\text{kom}}$  auf die für den Start der Basisaustauschschritte festgelegte Düsenauswahl  $I[0] = I_{\text{start}}$  erforderlich. Dazu dient die schon bereitgestellte invertierte

-1  
Basismatrix  $B_{b.start}$ , und es gilt:

$$\underline{b}_{tab.start} = B_{b.start}^{-1} \cdot \underline{b}_{kom}.$$

5 Mit der schon bereitgestellten Düsenauswahlidentifikationsnummer für den Start  $I[0] = I_{start}$  und dem neu berechneten Vektor  $\underline{b}_{tab}[0] = \underline{b}_{tab.start}$  steht ein reduziertes und dual zulässiges Starttableau  $[I[0] \ \underline{b}_{tab}[0]]$  bereit.

10 Dann erfolgt die Ausführung der Basisaustauschschritte (zyklischer Verfahrensteil):

Der folgend beschriebene Verfahrensteil muß wiederholt solange ausgeführt werden, bis die optimale Düsenauswahl mit den  
15 optimalen Ansteuerwerten gefunden wurde oder festgestellt wird, daß es für den aktuell vorliegenden Kräfte-Momenten-Vektor und die vorliegende Düsenanordnung keine Lösung gibt.

20 Da von einem dual zulässigen Simplextableau in Form des reduzierten Starttableaus ausgegangen wird und durch die Basisaustauschschritte immer wieder nur eine Düsenauswahl erzeugt werden kann, deren Simplextableau dual zulässig ist, kann bei der Durchführung der Basisaustauschschritte immer wieder auf die im Initialisierungsteil des Verfahrens bereitgestellten Daten  
25 insbesondere im Feld der Koeffizientenmatrizen aller optimalen und damit gleichzeitig aller dual zulässigen Simplextableaus und in der Pivotspaltenindizesmatrix zurückgegriffen werden.

Erster Schritt:

30 Finde einen negativen Wert in  $\underline{b}_{tab}[n]$ .  $n$  in eckigen Klammern bezeichnet die Nummer des Iterationsschrittes. Enthält  $\underline{b}_{tab}[n]$  keinen negativen Wert, liegt die Lösung des linearen Optimierungsproblems vor, und es kann der Vektor der Düsenansteuerwerte  $\underline{k}_{opt}$  aufgebaut werden. Enthält  $\underline{b}_{tab}[n]$  negative  
35 Werte, dann wird eine dieser Zeilen als Pivotzeile  $z[n]$  gewählt. Es ist günstig, die Zeile des betragsgrößten negativen Elements in  $\underline{b}_{tab}[n]$  als Pivotzeile zu wählen.

Zweiter Schritt:

Mit Kenntnis der Düsenauswahlidentifikationsnummer  $I[n]$ , und der im ersten Schritt gewählten Pivotzeile  $z[n]$  wird aus der Pivotspaltenindizesmatrix  $\underline{P}$  der dazugehörige Pivotspaltenindex mit  $s[n] = \underline{P} \ I[n]z[n]$  ausgelesen. Ist in  $\underline{P}$  kein Pivotspaltenindex angegeben ( $\underline{P} \ I[n]z[n] = 0$ ), muß eine andere Pivotzeile ausgewählt werden. Ist zu keiner der möglichen Pivotzeilen in der Pivotspaltenindizesmatrix eine Pivotspalte indiziert, existiert keine Lösung des linearen Optimierungsproblems. Sind Pivotzeile und Pivotspalte ermittelt, wird zum dritten Schritt übergegangen.

Im dritten und im vierten Schritt wird der eigentliche Basisaustauschschritt durch Ermittlung des nächsten reduzierten Simplextableaus ausgeführt:

Dritter Schritt:

Mit Hilfe der Koeffizienten in der Pivotspalte  $s[n]$  von  $\underline{A}_{\text{tab}}[n]$  wird aus  $\underline{b}_{\text{tab}}[n]$  der neue Basisvariablenwertvektor  $\underline{b}_{\text{tab.neu}}$  berechnet. Die benötigten Elemente des Pivotspaltenvektors  $\underline{a}$  aus  $\underline{A}_{\text{tab}}[n]$  können direkt aus dem Feld der Koeffizientenmatrizen aller Optimaltableaus mit  $a_{\text{tab } k \ s[n]}[n] = f_k s[n] I[n]$  ausgelesen werden.

Die Elemente des neuen Basisvariablenwertvektors werden wie folgt berechnet:

Der neue Wert in der Pivotzeile  $z[n]$  wird berechnet nach:

$$b_{\text{tab.neu } z[n]} = \frac{b_{\text{tab } z[n]}[n]}{f_{z[n] s[n]} I[n]},$$

wobei  $f_{z[n] s[n]} I[n]$  das entsprechend indizierte Pivotelement aus  $\underline{A}_{\text{tab}}[n]$  ist.

Die neuen Werte in den anderen Zeilen werden berechnet nach:

$$b_{\text{tab.neu } k} = b_{\text{tab } k}[n] - b_{\text{tab.neu } z[n]} \cdot f_{k s[n]} I[n]$$

wobei: ( $k = 1(1)6$ ) aber ( $k \neq z[n]$ )

Da der neuberechnete Basisvariablenwertvektor  $\underline{b}_{\text{tab.neu}}$  zum



fiktiv angenommenen neuen sortierten Basisvariablenindizesvektor  $\underline{\lambda}_b[n+1]$  passen muß, ist im allgemeinen der neuberechnete Basisvariablenwertevektor entsprechend umzuordnen. Dazu sind im neuberechneten Basisvariablenwertevektor  $\underline{b}_{\text{tab.neu}}$  lediglich die Werte zwischen der aktuellen Pivotzeile  $z[n]$  und der mit Hilfe von  $I[n]$  und  $z[n]$  aus der Zeilenaustauschindizesmatrix  $\underline{T} = [t_{Iz}]$  auszulesenden Austauschzeile  $z_{\text{tausch}}[n] = t_{I[n]} z[n]$  zyklisch zu tauschen. Die Austauschzeile  $z_{\text{tausch}}[n]$  ist die Zeile, wohin der Wert des neuberechneten Basisvariablenwertevektors plaziert wird, der in  $\underline{b}_{\text{tab.neu}}$  in der Pivotzeile  $z[n]$  steht. Nach diesem Umordnen des neuberechneten Basisvariablenwertevektors liegt der für den folgenden Basisaustauschschritt benötigte Basisvariablenwertevektor  $\underline{b}_{\text{tab}}[n+1]$  vor.

Vierter Schritt:

Mit Kenntnis von  $I[n]$  und der Pivotzeile  $z[n]$  wird mit  $I[n+1] = u_{I[n]} z[n]$  die Düsenauswahlidentifikationsnummer ermittelt, die zum neuberechneten und nach aufsteigenden Basisvariablenindizes sortierten Basisvariablenwertevektor  $\underline{b}_{\text{tab}}[n+1]$  gehört. Der Basisaustauschschritt ist damit vollzogen, das neue reduzierte Tableau  $[I[n+1] \underline{b}_{\text{tab}}[n+1]]$  liegt vor, und es kann die Lösung des linearen Optimierungsproblems mit dem ersten Schritt des zyklischen Verfahrensteils fortgesetzt werden.

Bricht das Verfahren mit einem Basisvariablenwertevektor, der keine negativen Werte mehr enthält, ab, so liegt der optimale 6-dimensionale Basisvariablenwertevektor  $\underline{b}_{\text{tab.opt}} = \underline{b}_{\text{tab}}[n_{\text{end}}]$  vor, und es kann mit Hilfe von  $I[n_{\text{end}}]$  aus der Basisindizesmatrix  $\underline{L}$  der zum aktuellen Basisvariablenwertevektor gehörende Vektor der Basisvariablenindizes mit  $\underline{\lambda}_b[n_{\text{end}}] = \underline{1}_{I[n_{\text{end}}]}$  end

ausgelesen werden. Mit Kenntnis der beiden Vektoren  $\underline{b}_{\text{tab}}[n_{\text{end}}]$  und  $\underline{\lambda}_b[n_{\text{end}}]$  wird der optimale D-dimensionale Ansteuervektor für die Düsen  $\underline{k}_{\text{opt}}$  aufgebaut.

Für die Lösung des linearen Optimierungsproblems für

unterschiedliche Kräfte-Momenten-Vektoren sind im allgemeinen auch unterschiedlich viele Basisaustauschschritte  $n_{\text{end}} \in \{0, 1, \dots, n_{\text{max}}\}$  erforderlich. Bei Simulationsrechnungen mit einer Düsenanordnung von 12 Düsen wurden in sehr seltenen Fällen bis zu  $n_{\text{max}} = 10$  Basisaustauschschritte durchgeführt, obwohl im Durchschnitt nur ca. 3,5 Basisaustauschschritte nötig waren. Bei geeigneter Wahl des Starttableaus  $[I_{\text{start}} \mid b_{\text{tab.start}}]$  sind jedoch nur in ca. 0,5 % aller Fälle mehr als 5 Austauschschritte notwendig. Im allgemeinen bleibt es ohne merkbliche Konsequenzen für die Anwendung, wenn die Anzahl der maximal auszuführenden Austauschschritte auf einen Wert begrenzt wird, bei dem nahezu alle Fälle vollständig bearbeitet werden und in den Fällen, in denen doch noch negative Werte im Basisvariablenwertvektor stehen, diese zu Null gesetzt werden. Auf diese Weise kann der Worst-Case-Rechenaufwand weiter gesenkt werden. Anwendungen dieser Verfahrensmöglichkeit bei der Simulation in geschlossenen Regelkreisen zeigten keine bemerkbare Verschlechterung der Regelgüte oder eine Erhöhung des Treibstoffverbrauchs.

Enthält der Basisvariablenwertvektor nach der Ausführung der maximal erlaubten Anzahl von Basisaustauschschritten noch negative Werte, ist es prinzipiell auch möglich, daß keine Lösung des linearen Optimierungsproblems existiert. Dieser Fall kann dann auftreten, wenn eine Düsenanordnung vorliegt, die nicht beliebige Kräfte und Momente aus dem Bereich aller zugelassenen Kräfte-Momenten-Vektoren erzeugen kann. Damit in diesen Fällen keine zu großen Fehlkräfte und Fehlmomente erzeugt werden, kann in Abhängigkeit vom Betrag der negativen Elemente im Basisvariablenwertvektor entschieden werden, ob die negativen Elemente zu Null gesetzt werden und der Ansteuervektor für die Düsen aufgebaut wird oder generell keine Ansteuerung der Düsen erfolgt.

Kommen bei der Abarbeitung des Simplexalgorithmus entartete Optimaltableaus vor, dann ist es theoretisch möglich, daß der Algorithmus in einen Endloszyklus läuft und nicht konvergiert. In Simulationsrechnungen mit unterschiedlichen Düsenanordnungen

ist dieser Fall allerdings noch nie eingetreten und wird deshalb auch nicht explizit berücksichtigt. Für den dualen Simplexalgorithmus kann man durch die gewählte Düsenanordnung sicherstellen, daß keine dual entarteten Optimaltableaus existieren. Für den primalen Simplexalgorithmus, also das Auftreten primal entarteter Optimaltableaus, ist das so nicht möglich.

Soll bei der Ermittlung der treibstoffminimalen Triebwerksansteuerung der unterschiedliche spezifische Treibstoffverbrauch  $c_j$ ,  $j=1(1)D$  der einzelnen Triebwerke berücksichtigt werden, liegt die Zielfunktion

$$\text{vor. } \sum_{j=1}^D c_j k_{\text{opt } j} = \text{Min !}$$

Die Berücksichtigung der Gewichtskoeffizienten ist in dem Verfahren für den on-line auszuführenden Verfahrensteil ohne Mehraufwand möglich.

Fällt eine Düse aus, ändert sich die Düsenanordnung im Sinne dieses Verfahrens. Das Verfahren auf die neue Düsenanordnung anzuwenden erfordert, daß alle Daten, die im Initialisierungsteil des Verfahrens bereitgestellt wurden, für die neue Düsenanordnung bereitgestellt werden.

Da sich die neue Düsenanordnung nur durch den Wegfall einer Düse von der alten Düsenanordnung unterscheidet, gibt es Möglichkeiten, die neuen Daten durch eine Aktualisierung der alten Daten zu ermitteln. Durch die Bereitstellung eines erweiterten Feldes von Koeffizientenmatrizen, in dem auch diejenigen Koeffizientenmatrizen abgelegt sind, die durch den Ausfall von Düsen Koeffizientenmatrizen von Optimaltableaus werden, und entsprechend erweiterter Adreßmatrizen, kann der Aktualisierungsaufwand stark reduziert werden und für bestimmte Matrizen ganz entfallen.

Schließlich besteht die Möglichkeit, die Daten für alle

Düsenanordnungen, die durch den Ausfall einer Düse zu erwarten sind, vorab bereitzustellen, und bei Ausfall einer bestimmten Düse dann auf die entsprechenden neuen Daten umzuschalten. Bis zum Ausfall einer nächsten Düse müssen für die dann zu erwartenden Düsenanordnungen die Daten wiederum bereitgestellt werden, um dann durch Umschalten auf den nächsten Düsenausfall reagieren zu können.

Auch bei einer Verschiebung des Schwerpunktes des Raumfahrzeuges kommt es zu einer Veränderung der Düsenanordnung im Sinne dieses Verfahrens. Im allgemeinen führt das zu einer Veränderung der Systemmatrix. Daher müssen alle von ihr abgeleiteten Daten neu bereitgestellt werden.

Das zuvor beschriebene Verfahren kann zur weiteren Einsparung von Rechenaufwand und Speicherplatzbedarf noch modifiziert werden:

- In voranstehender Beschreibung wurde stets von der Steuerung aller 6 Freiheitsgrade des Raumfahrzeugs ausgegangen. Das Verfahren ist auch auf die Steuerung von 1 bis 5 Freiheitsgraden anwendbar. Es ist lediglich die Streichung bzw. die Nichtberücksichtigung der den nicht zu steuernden Freiheitsgraden entsprechenden Zeilen in der Systemmatrix und der von ihr abgeleiteten Vektoren und Matrizen erforderlich. Desgleichen ist die Steuerung einer sich ständig ändernden Teilmenge aller 6 Freiheitsgrade möglich. Liegt eine schiefe Düsenanordnung vor, bleiben jedoch die nicht gesteuerten Freiheitsgrade im allgemeinen nicht unbeeinflusst.

- Müssen am Raumfahrzeug nicht beliebige Kräfte und Momente ausgeübt werden, ist der Einsatz einer reduzierten Düsenanordnung möglich. Das vorliegende Verfahren ist auch für derartige Anordnungen anwendbar. Es sollte nur gewährleistet sein, daß die kommandierten Kräfte und Momente des Kommandos durch die vorliegende Düsenanordnung realisierbar sind. Ist das Kommando nicht realisierbar, gibt das Verfahren an, daß keine Lösung des linearen Optimierungsproblems existiert.

- In Abhängigkeit von der vorliegenden Düsenanordnung kommt es vor, daß von den im Feld der Koeffizientenmatrizen aller Optimaltableaus abgelegten Koeffizientenmatrizen bestimmte Spalten nie als Pivotspalte ausgewählt werden. Nach Berechnung der Pivotspaltenindizesmatrix  $\underline{p}$  können die nicht benötigten Spalten aller Koeffizientenmatrizen einfach ermittelt werden. Es ist möglich, ein Feld aller relevanten Pivotspaltenvektoren  $\underline{v}$  zu erstellen, in dem nur die Spalten der Koeffizientenmatrizen aller Optimaltableaus abgelegt sind, die tatsächlich als Pivotspaltenvektoren benötigt werden. Dadurch kann eine signifikante Speicherplatzersparnis erreicht werden. Die Adressierung der Matrixspalten im Feld aller relevanten Pivotspaltenvektoren erfordert keinen erhöhten Rechenaufwand. Jede Spalte hat im Feld aller relevanten Pivotspaltenvektoren ihren Spaltenindex. Wird in einer veränderten Pivotspaltenindizesmatrix, der Pivotspaltenidentifikationsnummernmatrix  $\underline{0} = [o_{ik}]$  nicht der Spaltenindex eines Pivotspaltenvektors in einer Koeffizientenmatrix angegeben, sondern gleich die Pivotspaltenidentifikationsnummer als Spaltenindex  $r$  im Feld aller relevanten Pivotspaltenvektoren  $\underline{v}$ , dann kann im zweiten Schritt des zyklischen Verfahrensteils mit  $r = o_{ik}$  gleich der Spaltenindex im Feld aller relevanten Pivotspaltenvektoren  $\underline{v} = [v_{kr}]$  angegeben werden. Die Ermittlung der Elemente des neuen Basisvariablenwertvektors im dritten Schritt des zyklischen Verfahrensteils ändert sich dann wie folgt:

$$b_{tab, neu \ z[n]} = \frac{b_{tab \ z[n]} [n]}{v_{z[n]} r[n]},$$

wobei  $v_{z[n]} r[n]$  das entsprechend indizierte Pivotelement aus  $\underline{A}_{tab} [n]$  ist. Die neuen Werte in den anderen Zeilen werden berechnet nach:

$$b_{tab, neu \ k} = b_{tab \ k} [n] - b_{tab, neu \ z[n]} \cdot v_{k \ r[n]}$$

wobei:  $(k = 1(1)6)$  aber  $(k \neq z[n])$

Die weiteren Verfahrensbestandteile bleiben unverändert.

- Liegt ein Feld aller relevanten Pivotspaltenvektoren  $\underline{v}$  vor,

kann insbesondere bei Düsenanordnungen, die bestimmte Symmetrien aufweisen, festgestellt werden, daß relevante Pivotspaltenvektoren unterschiedlicher Optimaltableaus numerisch identisch sind. Da das mehrmalige Ablegen gleicher Pivotspaltenvektoren nicht notwendig ist, kann erneut weiterer Speicherplatz eingespart werden. Beim sukzessiven Aufbau des Feldes aller relevanten Pivotspaltenvektoren im Initialisierungsteil des Verfahrens kann überprüft werden, ob ein numerisch identischer Pivotspaltenvektor zum gerade ermittelten Pivotspaltenvektor schon in  $\underline{V}$  abgelegt wurde. Ist dies der Fall, kann das erneute Ablegen dieses relevanten Pivotspaltenvektors entfallen und in der zu  $\underline{V}$  gehörigen Pivotspaltenidentifikationsnummernmatrix  $\underline{Q}$  wird die Pivotspaltenidentifikationsnummer (Spaltenindex) des schon im Feld aller relevanten Pivotspaltenvektoren abgelegten Pivotspaltenvektors eingetragen.

- Besteht das Erfordernis, den Speicherbedarf des Verfahrens noch weiter zu reduzieren, kann eine Verfahrensvariante eingesetzt werden, bei der es nicht erforderlich ist, alle relevanten Pivotspaltenvektoren, sondern nur noch Repräsentantenvektoren im Rechnerspeicher abzulegen. Repräsentantenvektoren sind relevante Pivotspaltenvektoren, aus denen mit nur minimalem Rechenaufwand weitere relevante Pivotspaltenvektoren berechnet werden können.

Jeder Pivotspaltenvektor  $\underline{a} = [a_1 a_2 \dots a_i \dots a_n]^T$  gehört zu einer bestimmten Basis, z.B.

$\underline{\lambda}_b(I_1) = [\lambda_{k.1} \lambda_{1.2} \dots \lambda_{s.i} \dots \lambda_{p.n}]^T$  und zu einer Nichtbasisvariablen, z.B.  $\lambda_{nb} = \lambda_r$ . Wenn  $a_i$  verschieden von Null ist, läßt sich aus  $\underline{a}(I_1, \lambda_r) = [a_1 a_2 \dots a_i \dots a_n]^T$  derjenige Pivotspaltenvektor

$\underline{a}_{neu} = \underline{a}(I_2, \lambda_s) = [a_{neu.1} a_{neu.2} \dots a_{neu.i} \dots a_{neu.n}]^T$  mit

$$a_{neu.i} = \frac{1}{a_i} \quad \text{und} \quad a_{neu.k}(k \neq i) = -a_k \cdot a_{neu.i}$$

berechnen, der zur Basis

$\underline{\lambda}_b(I_2) = [\lambda_{k.1} \lambda_{1.2} \dots \lambda_{r.i} \dots \lambda_{p.n}]^T$  und zur

Nichtbasisvariablen  $\lambda_{nb} = \lambda_s$  gehört. So kann aus  $\underline{a}(I_1, \lambda_r)$  mit der Angabe des Austauschindex  $i$  der neue Pivotspaltenvektor  $\underline{a}(I_2, \lambda_s)$  berechnet werden.

5 Auf diese Weise können aus einem z.B. sechsdimensionalen Pivotspaltenvektor bis zu sechs weitere Pivotspaltenvektoren berechnet werden. Für die Anwendung im Verfahren zur treibstoffminimalen Düsenansteuerung kann man sich jetzt auf das Speichern derjenigen relevanten Pivotspaltenvektoren als  
10 Repräsentantenvektoren beschränken, die erforderlich sind, um alle relevanten Pivotspaltenvektoren wie angegeben zu berechnen.

Für die Ermittlung einer möglichst kleinen Anzahl von  
15 Repräsentantenvektoren lassen sich sehr günstig Genetische Algorithmen als Optimierungungsverfahren einsetzen.

Für eine geeignete Adressierung der Repräsentantenvektoren in der Matrix aller Repräsentanten sind statt der  
20 Pivotspaltenindizes - bzw. Pivotspaltenidentifikationsnummernmatrix einmal eine Repräsentantenidentifikationsnummernmatrix  $\underline{R}$  und weiterhin eine Austauschindizesmatrix  $\underline{S}$  erforderlich. In der Repräsentantenidentifikationsnummernmatrix  $\underline{R}$  wird für jede  
25 Düsenauswahlidentifikationsnummer und jede Pivotzeile die Identifikationsnummer des Repräsentantenvektors angegeben, der für die Berechnung des tatsächlich benötigten Pivotspaltenvektors verwendet werden kann. In der Austauschindizesmatrix  $\underline{S}$  wird für jede  
30 Düsenauswahlidentifikationsnummer und jede Pivotzeile der Zeilenindex des Austauschelements angegeben, um aus dem Repräsentantenvektor den tatsächlich benötigten Pivotspaltenvektor berechnen zu können. Steht an einer Stelle in der Austauschindexmatrix eine Null, bedeutet dies, daß der  
35 adressierte Repräsentantenvektor unmittelbar der erforderliche Pivotspaltenvektor ist und daher die Umrechnung in den aktuell benötigten Pivotspaltenvektor entfällt.

Da stets mit nach Basisvariablenindizes sortierten Pivotspaltenvektoren gearbeitet wird, muß der zunächst aus dem Repräsentantenvektor berechnete Pivotspaltenvektor noch umsortiert werden (z.B. nach aufsteigenden Basisvariablenindizes), um benutzt werden zu können. Wird die Sortierung der Größe der Basisvariablen vorgenommen, gibt es bei einem sechselementigen Vektor genau 30 Möglichkeiten der Umsortierung, um die erforderliche Ordnung wieder herzustellen. Bei einer erforderlichen Umsortierung wird stets ein Vektorelement an einer Position im Vektor entnommen und auf eine andere Position geschrieben. Die Vektorelemente zwischen den beiden Positionen werden entsprechend verschoben.

In einer Sortieridentifikationsnummernmatrix  $\underline{G} = [g_{I k}]$  wird für jeden Repräsentanten und jede Austauschzeile die Sortieridentifikationsnummer angegeben, nach der der Vektor umgeordnet werden muß, um den benötigten Pivotspaltenvektor zu erhalten.

Aus einem Repräsentantenvektor können durch Basisaustausch und/oder oben beschriebene Umordnung bis zu  $7 \times 31 = 217$  Vektoren gebildet werden. Werden alle diese Möglichkeiten berücksichtigt, kann es aufgrund von Symmetrien in der Triebwerksanordnung vorkommen, daß weniger Repräsentantenvektoren erforderlich sind, als würden nur die sieben aus einem Repräsentantenvektor gebildeten relevanten Pivotspaltenvektoren in Betracht gezogen.

Eine weitere Verfahrensvariante ergibt sich daraus, daß auf den Basisaustausch am Repräsentantenvektor verzichtet wird und nur die 30 Umordnungsmöglichkeiten des Repräsentantenvektors berücksichtigt werden. Auf diese Weise repräsentiert ein Repräsentantenvektor 31 Vektoren. Aufgrund von Symmetrien in der Triebwerksanordnung können auch auf diese Weise mehrere relevante Pivotspaltenvektoren generiert werden. Im Vergleich zur letzten Verfahrensvariante werden im allgemeinen jedoch mehr Repräsentantenvektoren benötigt, jedoch entfällt



gleichzeitig der Rechenaufwand für den Basisaustausch am Repräsentantenvektor, und es ist die Austauschindizesmatrix S nicht erforderlich.

**Patentansprüche**

1. Verfahren zur insgesamt treibstoffminimalen rechnerge-  
stützten Ansteuerung einer beliebig festgelegten Anzahl und  
beliebig festgelegten Anordnung von Düsen an einem  
Raumfahrzeug,

**dadurch gekennzeichnet,**

- daß ein treibstoffminimaler Ansteuervektor ( $k_{opt}$ ) mit  
ausschließlich nicht negativen Ansteuerwerten für alle  
vorgegebenen Düsen mit Hilfe des dualen Simplexalgorithmus  
gebildet wird,
- daß dazu jeder Düsenauswahl aus der Gesamtzahl von Düsen am  
Raumfahrzeug, die die optimale Düsenauswahl für die treib-  
stoffminimale Realisierung eines beliebigen Kommando-  
vektors ( $\underline{b}_{kom}$ ) darstellt, eine Düsenauswahliden-  
tifikationsnummer (I) zugeordnet wird,
- daß für die Ermittlung der optimalen Ansteuerung zunächst  
der Kommandovektor ( $\underline{b}_{kom}$ ) der die auszuübende Kraft  
und/oder Momentenkomponenten enthält, durch Multiplikation  
mit einer Transformationsmatrix ( $(B_{start})^{-1}$ ) in einen  
Startvektor ( $\underline{b} = \underline{b}_{start}$ ) transformiert wird,
- daß danach der duale Simplexalgorithmus durchgeführt wird,  
bis der Vektor der Ansteuerwerte ( $\underline{b}$ ) nur nichtnegative  
Ansteuerwerte enthält oder aber die Nichtexistenz einer  
Lösung angezeigt wird,
- und daß dabei der duale Simplexalgorithmus realisiert wird,  
indem vorab alle Daten, die für die Abarbeitung des dualen  
Simplexalgorithmus notwendig sind und sich off-line (vor-  
ab) berechnen lassen, ermittelt werden, in Datenfeldern  
im Rechnerspeicher abgelegt werden und beim Einsatz des  
dualen Simplexalgorithmus während des on-line-Betriebes  
durch geeignete Adressierungen aus dem Rechnerspeicher  
abgerufen und in der Rechnung verwendet werden, wobei nur  
mit einem reduzierten Simplextableau gearbeitet wird, in-  
dem lediglich die Düsenauswahlidentifikationsnummer und  
der dazugehörige Vektor der Ansteuerwerte ( $\underline{b}$ ) geführt  
werden.

2. Verfahren nach Anspruch 1,

**dadurch gekennzeichnet,**

daß die Transformationsmatrix  $((B_{\text{start}})^{-1})$  die invertierte Basismatrix derjenigen Düsen darstellt, die zur Startdüsen-  
auswahl gehören, diese Düsenauswahl für einen beliebigen  
Kommandovektor optimal ist, diese Düsenauswahl eine Start-  
Düsenauswahlidentifikationsnummer ( $I_{\text{start}}$ ) zugeordnet ist und  
der Startvektor ( $\underline{b} = \underline{b}_{\text{start}}$ ) die Ansteuerwerte dieser Düsen  
enthält.

3. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 oder 2,

**dadurch gekennzeichnet,**

- daß jede Düse am Raumfahrzeug eine Identifikationsnummer erhält, und die Werte im Vektor der Ansteuerwerte für eine bestimmte Düsenauswahl stets in einer festgelegten Ordnung anhand der Identifikationsnummern der Düsen sortiert werden,
- daß bei der Abarbeitung des dualen Simplexalgorithmus nach der Ermittlung einer Pivotzeilennummer und mit Kenntnis der Düsenauswahlidentifikationsnummer der aktuell vorliegenden Düsenauswahl die entsprechende Pivotspaltennummer aus einer vorab bereitgestellten Pivotspaltenindizesmatrix ausgelesen wird,
- daß das Nichtvorhandensein einer Pivotspaltennummer zu der vorliegenden Düsenauswahlidentifikationsnummer und zu der gewählten Pivotzeile durch einen besonderen Eintrag in der Pivotspaltenindizesmatrix eindeutig angezeigt wird,
- und daß die Nichtexistenz einer Lösung dadurch angezeigt wird, daß zu keiner möglichen Pivotzeile in der Pivotzeilenindizesmatrix eine Pivotspaltennummer angegeben ist.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3,

**dadurch gekennzeichnet,**

- daß der Pivotspaltenvektor der Koeffizientenmatrix des aktuellen Simplextableaus, dessen Werte für die Berechnung neuer Ansteuerwerte für die Düsen einer neuen Düsenauswahl benötigt werden, mit Kenntnis der Düsenauswahl vor dem Basisaustauschschritt und der gewählten Pivotspaltennummer

aus einem vorab bereitgestellten Feld aller möglichen optimalen Koeffizientenmatrizen ausgelesen wird,

- daß der Vektor der Ansteuerwerte für die Düsen der Düsenauswahl, die nach dem Basisaustauschschritt vorliegt, berechnet wird und die Werte in diesem Vektor entsprechend der Zuordnung zu den Düsen und entsprechend der festgelegten Ordnung der Identifikationsnummern für die Düsen sortiert werden.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet,

- daß mit Kenntnis der Düsenauswahlidentifikationsnummer vor dem Basisaustauschschritt und der gewählten Pivotzeilennummer die Düsenauswahlidentifikationsnummer derjenigen Düsenauswahl, die nach dem Basisaustauschschritt vorliegt, aus einer Düsenauswahlidentifikationsnummernmatrix ausgelesen wird
- und daß nach Vorliegen eines Vektors der Ansteuerwerte, der nur noch nicht negative Werte enthält, mit Kenntnis der dazugehörigen Düsenauswahlidentifikationsnummer der Vektor der Düsenindizes aus einer Basisvariablenindizesmatrix ausgelesen wird und die mit ihrer Düsenidentifikationsnummer indizierten Düsen den entsprechenden Wert aus dem Vektor der Ansteuerwerte ( $\underline{b}$ ) erhalten sowie die übrigen Düsen den Ansteuerwert Null zugewiesen bekommen und damit der Ansteuervektor ( $\underline{k}_{\text{opt}}$ ) bestimmt ist.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet,

- daß nur diejenigen Spalten von Koeffizientenmatrizen dual zulässiger Simplextableaus in einer Matrix aller relevanten Pivotspaltenvektoren abgelegt werden, die bei der Abarbeitung des Verfahrens tatsächlich als Pivotspaltenvektoren ausgewählt werden können,
- und daß identische relevante Pivotspaltenvektoren nur einmal in dieser Matrix abgelegt werden.

7. Verfahren nach Anspruch 6,  
dadurch gekennzeichnet,

- daß für die Adressierung der relevanten Pivotspaltenvektoren jedem Pivotspaltenvektor in der Matrix aller relevanten Pivotspaltenvektoren eine Pivotspaltenidentifikationsnummer zugewiesen wird und diese in einer Pivotspaltenidentifikationsnummernmatrix derart eingetragen werden, daß bei Kenntnis der aktuellen Düsenauswahlidentifikationsnummer und der aktuell gewählten Pivotzeilennummer die Pivotspaltenidentifikationsnummer des aktuell benötigten Pivotspaltenvektors auslesbar ist,
- daß das Nichtvorhandensein einer Pivotspalte zu einer gewählten Pivotzeile durch einen besonderen Eintrag in der Pivotspaltenidentifikationsnummernmatrix eindeutig angezeigt wird,
- und daß die Nichtexistenz einer Lösung dadurch bestimmt wird, daß zu keiner möglichen Pivotzeile in der Pivotspaltenidentifikationsnummernmatrix eine Pivotspaltenidentifikationsnummer angegeben ist.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 7,  
dadurch gekennzeichnet,

daß statt der relevanten Pivotspaltenvektoren nur bestimmte Pivotspaltenvektoren als Repräsentantenvektoren im Rechnerspeicher abgelegt werden, wobei die Repräsentantenvektoren eine möglichst kleine Anzahl von Pivotspaltenvektoren darstellen, aus denen die tatsächlich benötigten relevanten Pivotspaltenvektoren ermittelt werden, und daß jeder Repräsentantenvektor eine Repräsentantenidentifikationsnummer zugewiesen bekommt und zur Adressierung der Repräsentantenvektoren eine Repräsentantenidentifikationsnummernmatrix verwendet wird, in der für jede Düsenauswahlidentifikationsnummer und jede Pivotzeilennummer die Repräsentantenidentifikationsnummer desjenigen Repräsentantenvektors eingetragen ist, der für die Berechnung des erforderlichen Pivotspaltenvektors verwendet wird.

9. Verfahren nach Anspruch 8,

**dadurch gekennzeichnet,**

daß in einer Austauschmatrix für jede Düsenauswahl-  
identifikationsnummer und jede Pivotzeilennummer der  
5 Zeilenindex der auszutauschenden Basisvariablen als  
Austauschelement angegeben ist, um aus dem Repräsentantenvektor  
den benötigten Pivotspaltenvektor zu berechnen.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9,

**dadurch gekennzeichnet,**

daß für die Möglichkeit der Veränderung der Düsenanordnung  
durch zu erwartende Düsenausfälle die entsprechenden Daten  
vorab berechnet und gespeichert werden und nach Feststellen  
eines Düsenausfalls automatisch durch den Rechner auf Verwen-  
15 dung der entsprechenden neuen Daten umgeschaltet wird.

11. Verfahren nach Anspruch 10,

**dadurch gekennzeichnet,**

daß die nach einem Düsenausfall erforderlichen neuen Daten  
20 durch eine entsprechende Korrektur und Aktualisierung der bis  
zum Düsenausfall verwendeten Daten bereitgestellt werden.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11,

**dadurch gekennzeichnet,**

25 daß das Verfahren unabhängig von der Dimension des Kommando-  
vektors ( $\underline{b}_{\text{kom}}$ ) angewendet wird und dabei für die Berechnung der  
vorab bereitgestellten Daten die nichtauszuübenden Komponenten  
aus der vollständigen Systemmatrix der Düsenanordnung  
eliminiert werden.

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

In tional Application No

PCT/EP 98/01595

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC 6 B64G1/26 G05D1/08

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 6 B64G G05D

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WIKTOR P J: "MINIMUM CONTROL AUTHORITY PLOT: A TOOL FOR DESIGNING THRUSTER SYSTEMS" JOURNAL OF GUIDANCE AND CONTROL AND DYNAMICS, vol. 17, no. 5, September 1994, pages 998-1006, XP000493390 cited in the application see page 1001, column 2, paragraph 8 - page 1002, column 1, paragraph 2 ---	1, 2
A	US 5 130 931 A (PALUSZEK MICHAEL A ET AL) 14 July 1992 see the whole document --- -/--	1, 2

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.

☒ Patent family members are listed in annex.

### \* Special categories of cited documents :

- "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- "E" earlier document but published on or after the international filing date
- "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- \* & document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

3 July 1998

Date of mailing of the international search report

16/07/1998

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Calvo de Nõ, R

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/EP 98/01595

## C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	VLADIMIROV V P, ALEKSANDROV E V: "Correction problem with a constraint on the number of impulses". COSMIC RESEARCH, vol. 18, no. 2, March 1980 - April 1980, pages 128-137, XP002070356 see abstract see page 128, paragraph 1 - paragraph 2 see page 134, line 23 - page 135, line 25 ----	1
A	DE 195 19 732 A (DAIMLER BENZ AEROSPACE AG) 5 December 1996 cited in the application see the whole document ----	1,2,10, 11
A	US 5 335 179 A (BOKA JEFFREY B ET AL) 2 August 1994 see abstract see column 5, line 30 - line 66 see figures 1,4 ----	1,2
A	US 5 140 525 A (SHANKAR UDAY J ET AL) 18 August 1992 see abstract ----	1,2
A	BRONSTEIN I N, SEMENDADJEV K A: "Taschenbuch der Mathematik" 1989, VERLAG HARRI DEUTSCH, THUN XP002070357 see page 695 - page 717 -----	1-9,12



# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/EP 98/01595

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 5130931 A	14-07-1992	NONE	
DE 19519732 A	05-12-1996	EP 0750239 A	27-12-1996
US 5335179 A	02-08-1994	NONE	
US 5140525 A	18-08-1992	NONE	

# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

In nationales Aktenzeichen

PCT/EP 98/01595

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES  
IPK 6 B64G1/26 G05D1/08

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

## B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)

IPK 6 B64G G05D

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

## C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	WIKTOR P J: "MINIMUM CONTROL AUTHORITY PLOT: A TOOL FOR DESIGNING THRUSTER SYSTEMS" JOURNAL OF GUIDANCE AND CONTROL AND DYNAMICS, Bd. 17, Nr. 5, September 1994, Seiten 998-1006, XP000493390 in der Anmeldung erwähnt siehe Seite 1001, Spalte 2, Absatz 8 - Seite 1002, Spalte 1, Absatz 2 ---	1,2
A	US 5 130 931 A (PALUSZEK MICHAEL A ET AL) 14. Juli 1992 siehe das ganze Dokument --- -/-	1,2

☒ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen

☒ Siehe Anhang Patentfamilie

\* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderscher Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderscher Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

3. Juli 1998

Absenddatum des internationalen Recherchenberichts

16/07/1998

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde  
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Calvo de Nõ, R

## C.(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	VLADIMIROV V P, ALEKSANDROV E V: "Correction problem with a constraint on the number of impulses" COSMIC RESEARCH, Bd. 18, Nr. 2, März 1980 - April 1980, Seiten 128-137, XP002070356 siehe Zusammenfassung siehe Seite 128, Absatz 1 - Absatz 2 siehe Seite 134, Zeile 23 - Seite 135, Zeile 25 ---	1
A	DE 195 19 732 A (DAIMLER BENZ AEROSPACE AG) 5.Dezember 1996 in der Anmeldung erwähnt siehe das ganze Dokument ---	1,2,10, 11
A	US 5 335 179 A (BOKA JEFFREY B ET AL) 2.August 1994 siehe Zusammenfassung siehe Spalte 5, Zeile 30 - Zeile 66 siehe Abbildungen 1,4 ---	1,2
A	US 5 140 525 A (SHANKAR UDAY J ET AL) 18.August 1992 siehe Zusammenfassung ---	1,2
A	BRONSTEIN I N, SEMENDADJEW K A: "Taschenbuch der Mathematik" 1989 , VERLAG HARRI DEUTSCH , THUN XP002070357 siehe Seite 695 - Seite 717 -----	1-9,12

# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP 98/01595

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 5130931 A	14-07-1992	KEINE	
DE 19519732 A	05-12-1996	EP 0750239 A	27-12-1996
US 5335179 A	02-08-1994	KEINE	
US 5140525 A	18-08-1992	KEINE	